

University of Groningen

Formation and evolution of galaxy clusters in cold dark matter cosmologies

Araya-Melo, Pablo Andres

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2008

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Araya-Melo, P. A. (2008). *Formation and evolution of galaxy clusters in cold dark matter cosmologies*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. [s.n.].

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Nederlandse Samenvatting

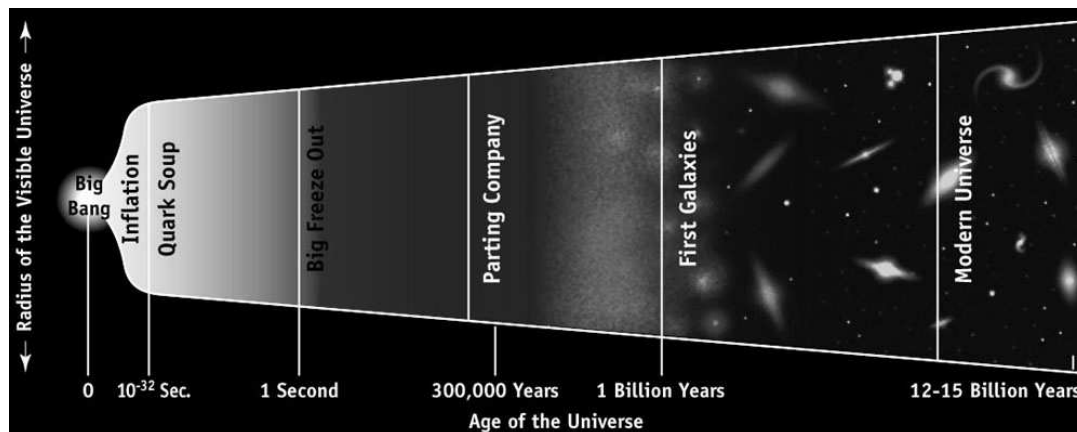
Vroege beschavingen hebben zich al afgevraagd waar alles vandaan kwam en hoe alles is begonnen. Eeuwenlang heeft de mensheid zich afgevraagd wat zijn positie is in dit onmetelijke Heelal waarin we leven. Nauw verbonden met deze fundamentele vraag is, is de vraag hoe het Heelal is ontstaan. Vroege civillizaties hadden een mythische voorstelling van het Heelal. Bijvoorbeeld de Mesopotamische beschavingen, de Sumerische en Babylonische, hadden een kosmogonie waarin de Aarde een schijf is, die is omgeven door de ondergrondse wateren van Apsu en de onderwereld van de doden, omgeven door de sterren. Ondanks het hoge niveau van de astronomische kennis in de neo-Babylonische wereld en zijn erfgenamen, is het tentijde van de Oude Grieken dat de astronomie en de kosmologie in een wetenschappelijk context wordt gezet. Voortbouwend op de nauwkeurige waarnemingen en archieven van de Babyloniërs worden in het Hellinistische Griekenland de eerste geometrische modellen ontwikkeld die in staat zijn kwantitatieve voorspellingen te doen. Zoals Eratosthenes die de omtrek van de Aarde mat en Aristarchus met zijn bepaling van de afmeting en afstand van de Aarde en de Maan. De laatste kwam zelfs met de suggestie dat de Zon in het centrum moest worden gezet, een wereldbeeld die pas met Copernicus en Galilei in de 15de en 16de eeuw werd geaccepteerd.

Het is de Wetenschappelijke Revolutie van de 16de en de 17de eeuw die de ontwikkeling van een echt wetenschappelijk model mogelijk maakt. Met Nicolai Copernicus in 1543 verliest de Aarde uiteindelijk zijn centrale positie in het Heelal. Gebruik makend van het werk van Copernicus, Brahe, Kepler en Galilei, was het Isaac Newton die hier voor het eerst de wetten van de zwaartekracht en mechanica in wist te ontdekken. Deze vormen de fundamentele van de klassieke fysica. Echter, deze wetten beschrijven een statische wereldbeeld met een zwaartekracht die op afstand werkt, en het is onmogelijk om hiermee het huidige dynamische kosmologisch wereldbeeld te beschrijven. Pas met de ontwikkeling van de Algemene Relativiteits Theorie door Einstein, kon de kosmologie in een wetenschappelijke context worden geplaatst. In deze metrische theorie van gravitatie is de ruimte-tijd een dynamisch medium, waarin gravitatie voortkomt uit de kromming van de ruimte-tijd. Spoedig realiseerde wat voor implicaties dit had voor het Heelal. Het was geen statisch geheel maar kon krimpen en/of expanderen. Friedmann en Lemaître zijn de eersten die dit hebben uitgewerkt voor een homogeen en isotroop expanderend Heelal. De bevestiging van deze theoretische ideeën volgde al vlug met de fundamentele ontdekking van Edwin Hubble in 1929 dat melkwegstelsels van ons afbewegen. De wet van Hubble stelt dat de expansiesnelheid van een ver melkwegstelsels proportioneel is met zijn afstand, dit is nog steeds de grondslag voor het huidige kosmologische onderzoek.

Big Bang Theorie en Inflatie

Het was Lemaître die de volledige gevolgen begreep van een uitdijende Heelal. Het vroege Heelal zou een stuk kleiner moeten zijn, en daarom een stuk dichter en heter dan het huidige Universum. Dit wordt met de term *Big Bangtheorie/Oerknaltheorie* aangeduid, wat doelt op het feit dat het Heelal op een zeker moment in het verleden is ontstaan. De leeftijd van het Heelal wordt op dit moment op 13.7 miljard jaar geschat. Ondanks het overweldigende succes van de standaard Big Bangtheorie, kan het niet de oorsprong van structuur in het Heelal verklaren.

Een mogelijke oplossing ligt in de aanname dat het vroege Heelal een phase van exponentiele expansie is ondergaan. Tijdens deze kosmische *inflatie*, 10^{-34} second na de Big Bang, werd het Heelal in een zeer kort tijd een factor 10^{60} groter. Inflatie kan een verklaring geven voor de platte geometrie van het Heelal, de uniformiteit van het stralingsveld en de oorsprong van kleine schommeling in dichtheid van materie. Deze verstoringen (oorspronkelijk op een subatomische schaal) zijn de kiemen waaruit sterren, melkwegstelsels en clusters van melkwegstelsels zijn ontstaan.



Figuur 1 — The Big Bangtheorie. Een schematische voorstelling van het Heelal sinds de Big Bang.

Kosmische AchtergrondStraling

Terwijl de eerste structuren zich begonnen te vormen, waren materie en straling nog aan elkaar gekoppeld. Het Universum was donker door de sterke interacties tussen fotonen en baryonen. Dit stadium duurde ongeveer 379000 jaar voort, en eindigde toen het Heelal koud genoeg was om stabiele atomen te vormen. Het Heelal, toen afgekoeld tot ongeveer 3000 Kelvin, werd ineens transparant; fotonen waren plots in staat om zich ongehinderd te verplaatsen. Deze fotonen kunnen nog steeds worden waargenomen, en vormt een stralingsveld dat zich in het gehele Heelal bevindt. Het staat bekend als de Kosmische Achtergrond Straling, en heeft een spectrum van een perfecte zwarte lichaamstraler met een temperatuur van $T = 2.755$ K. Deze achtergrondstraling is een van de belangrijkste bewijzen voor de Big Bang.

Donkere Materie

Toen het Universum was geëxpandeerd tot het de omvang had van 1/1090 keer de huidige grootte, begon materie de dynamica van het Heelal te domineren. De gravitatiekracht van *de donkere materie* is verantwoordelijk voor de vorming van structuren in het Heelal. Deze bijzondere vorm van materie is ongevoelig voor elektromagnetische krachten, waardoor het vrijwel onzichtbaar en dus moeilijk te bestuderen is. De huidige waarnemingen doen vermoeden dat ongeveer 85% van al de materie uit *donkere materie* bestaat. Het is een grote uitdaging voor de astronomie om deze getals verhoudingen te verklaren.

Donkere Energie

Een nog vreemdere component van het Heelal is de aanwezigheid van een hele bijzondere vorm van energie; *de donkere energie*. Het feit dat het een afstotende gravitatie-kracht heeft, is het enige wat er momenteel van bekend is. Waarnemingen wijzen uit dat 73% van de hoeveelheid energie voor rekening van de donkere energie komt. Dit aandeel is precies genoeg om er voor te zorgen dat het Heelal een

platte geometrie heeft. De waargenomen versnelde expansie, veroorzaakt door de donkere energie, kan het best worden verklaard met behulp van een kosmologische konstante, die voorkomt in Einstein's Relativiteits Theorie. Wanneer de donkere energie de dynamica van het Universum domineert, zijn structuren niet in staat om nog verder door te groeien. In het Heelal is dit op een expansiefactor van $a \sim 0.7$ gebeurd.

Grote Schaal Structuur van het Heelal

De Big Bangtheorie alleen beantwoordt wel de vraag over de oorsprong van het Heelal, maar geeft geen antwoord op hoe structuren in het Heelal zijn ontstaan. De groei van deze structuren is het resultaat van ineenstorting van kleine dichtheidsschommelingen onder invloed van de zwaartekracht. Als zo'n schommeling een grotere dichtheid heeft dan zijn omgeving is het in staat om in elkaar te vallen. Deze kleine klompjes begonnen geleidelijk samen te klonteren om steeds grotere objecten te vormen. De eerste objecten in het Heelal waren van subgalactische schaal. Zij hebben zich ontkoppeld aan de Hubble expansie en konden toen ineenstorten. De samenklontering van deze objecten leidde uiteindelijk tot de vorming van de eerste sterrenstelsels, die op hun beurt weer verder samenklonteren om clusters van melkwegstelsels te vormen. In dit hiërarchisch proces zijn clusters van sterrenstelsels de laatste en meest massieve ineengestorte objecten. Dus de tijd die nodig is voor clusters om in elkaar storten is ongeveer van dezelfde orde grootte als de leeftijd van het Heelal. Dit maakt clusters van sterrenstelsels tot essentiële onderdelen om de evolutie en vorming van het Universum te bestuderen.

Clusters van Sterrenstelsels

De grootste stabiele objecten in het Heelal zijn clusters van melkwegstelsels. De typische kenmerken van clusters zijn:

- Ze bevatten 50 tot 1000 melkwegstelsels, heet gas en grote hoeveelheid donkere materie.
- Ze hebben een totale massa van ongeveer $\sim 10^{14} - 10^{15} h^{-1} M_{\odot}$.¹
- Hun afmeting is van orde grootte $\sim 2-6 h^{-1} \text{Mpc}^2$.
- De sterrenstelsels in clusters hebben een snelheidsdispersie van ca. 800-1000 km/s.

Sterrenstelselclusters spelen een sleutelrol in het verkrijgen van onze huidige kennis en begrip van de Grote Schaal Structuur. De aanwezigheid van donkere materie werd voor het eerst in clusters ontdekt. Ook zijn ze bijzonder heldere X-ray bronnen. Dit wordt uitgestraald door het ijle hete gas, dat zich in de clusters bevindt en een typische temperatuur heeft van ongeveer $T \sim 10^7 - 10^8$ K. Verder zijn de clustersterrenstelsels van een zeer bijzondere soort, waardoor ze belangrijke informatie opleveren over de evolutie van melkwegstelsels.

Clusters zien er optisch uit als een verzameling van melkwegstelsels die bij elkaar worden gehouden door hun onderlinge zwaartekracht. Echter, de gemeten snelheden van de stelsels zijn veel te groot, en de zwaartekracht van de stelsels alleen zou nooit genoeg zijn om het bij elkaar te houden. Dit impliceert dat er dus nog meer massa moet zijn die we niet zien of dat er nog een extra kracht is die ervoor zorgt dat clusters niet uit elkaar vliegen. Gebleken is dat sterrenstelsels slechts $\sim 5\%$ van de totale massa uit maken, $\sim 10\%$ komt voor rekening van het X-ray stralende gas en het overgrote gedeelte bestaat uit donkere materie.

Aangezien cluster uitvoerig zijn bestudeerd en daardoor goed begrepen zijn, kunnen we ons afvragen of de aanwezigheid van donkere energie via clusters valt aan te tonen. Dit is de hoofddoelstelling van dit proefschrift.

¹ $1 M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30}$ kg, is de massa van de Zon

² $1 \text{ Mpc} = 3.086 \times 10^{22}$ mts.

In dit proefschrift

In dit proefschrift hebben we gekeken naar de invloed die de donkere energie heeft op de vorming en evolutie van clusters. Daaruit is gebleken dat de kosmologische constante niet of nauwelijks invloed heeft op de globale en individuele eigenschappen van clusters van sterrenstelsels. Wel heeft de total hoeveelheid materie in het Heelal een significante invloed op de evolutie van clusters.

Kosmologische Simulaties en Massa Distributies

Hoofdstuk 2 biedt een uitgebreide beschrijving van de kosmologische simulaties die we voor dit proefschrift hebben gebruikt. Deze numerieke simulaties omvatten zes open, vier kritische en drie gesloten Universa, zowel met als zonder kosmologische constante. De afmeting ($200 \text{ Mpc} h^{-1}$) en het aantal deeltjes (256^3) is voor elke periodieke simulatiekubus hetzelfde gehouden, dit geldt tevens voor de Hubble-expansie en de normalisatie van het spectrum. De simulaties zijn gestart op een roodverschuiving van 49, en liepen door tot de huidige kosmische tijd.

Om een onderlinge vergelijking mogelijk te kunnen maken tussen de simulaties die verschillende kosmologieën representeren, zijn de Fourier-fases van het beginveld hetzelfde gehouden. Hierdoor zijn we ervan verzekerd dat de structuren op grote schaal in alle simulaties hetzelfde zijn.

Figuur 2 laat deze eigenschap zien. We tonen doorsneden door het midden van de kubus voor drie verschillende modellen; ΛCDMF2 (een kritisch model, boven), ΛCDMO2 (een open model, midden) en ΛCDMC2 (een gesloten model, onder). Op grote schaal zien we hetzelfde patroon. De verschillen tussen de modellen zijn echter te zien in de mate van clustering. De open modellen, dus met een lage dichtheid, bevatten veel minder details dan de andere twee. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de extreem lage materiedichtheid in combinatie met een kosmologische constante. Hierdoor stopte de groei van structuur al op een zeer vroeg tijdstip. De uitvergrotingen aan de linker zijde van de figuur benadrukken dit verschil. Modellen met een hoge materie dichtheid laten een meer geevolueerde structuur zien, met een hogere mate van clustering.

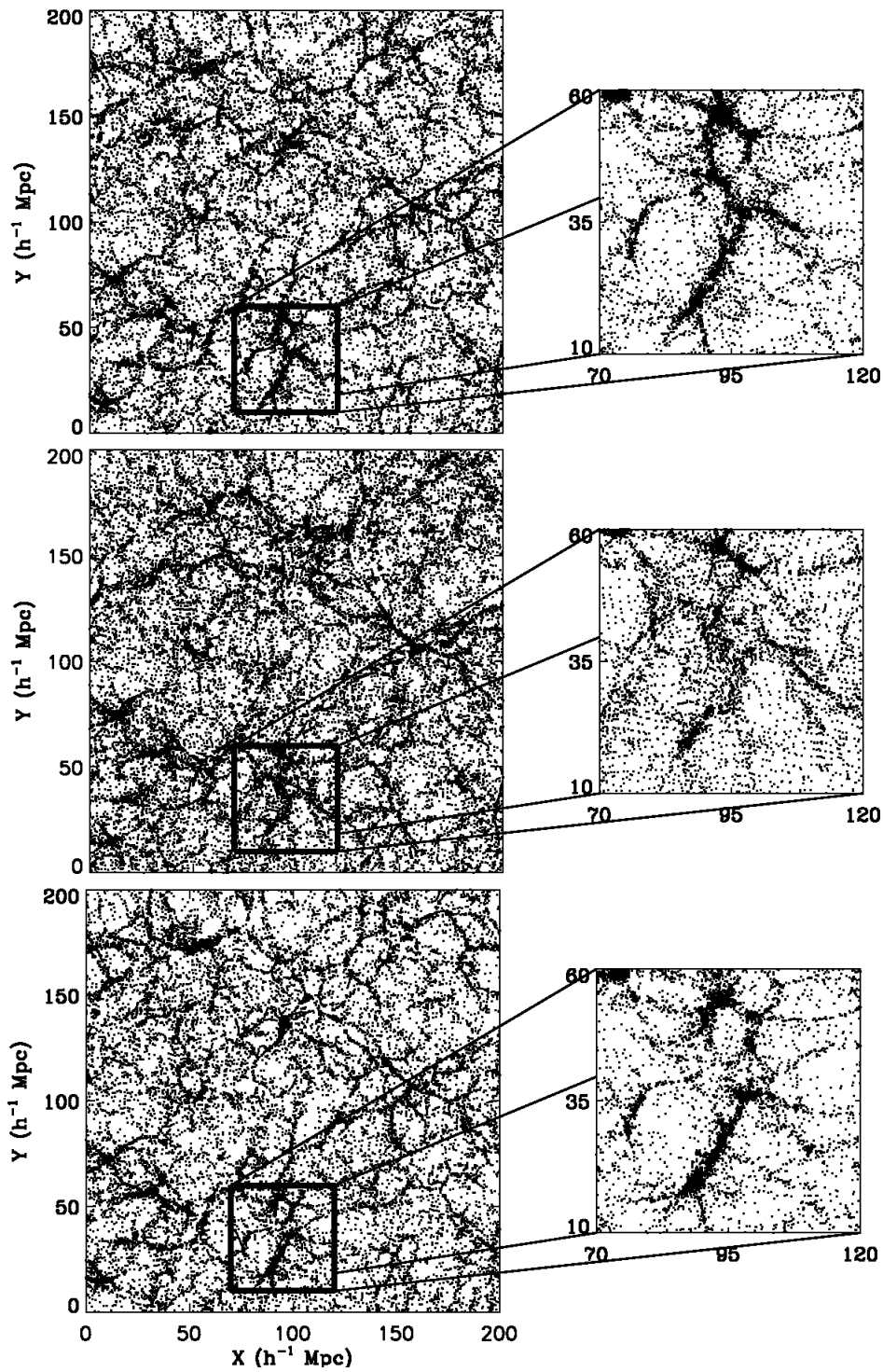
We hebben ook de massaverdeling van objecten in de simulaties bestudeerd. Deze verdeling presenteert het aantal objecten per volume-eenheid voor een gegeven massa. Uit dit onderzoek blijkt dat de massaverdeling inderdaad gevoelig is voor de totale hoeveelheid materie in het Heelal. Echter, de kosmologische constante heeft op de huidige verdeling geen significante invloed. Wel vinden we duidelijke verschillen op hogere roodverschuiving. De oorzaak hiervan is dat een verandering van de kosmologische constante zorgt voor andere dynamische tijdschalen.

Massa groei en virialisatie van clusters

In Hoofdstuk 3 beschrijven we de vorming en virialisatie van clusterobjecten. We hebben eerst gekeken naar de vormingsgeschiedenis van een aantal identieke clusters door te kijken naar het verloop in: roodverschuiving, terugkijktijd, en kosmische tijd. De gevonden verschillen zijn volledig te verklaren door de verandering van de materiedichtheid in de verschillende modellen. Net als de massaverdeling is de kosmologische constante alleen merkbaar via zijn invloed op de kosmische tijd.

Een belangrijke eigenschap van clusters is de accretiegeschiedenis. We hebben dit onderzocht door zowel te kijken naar een aantal individuele clusters als wel naar de gemiddelde eigenschappen van clusters in verschillende modellen. Als we kijken naar een enkele object dan blijkt dat accretie- en samenklonteringsprocessen duidelijk van invloed zijn op de ontwikkeling van een cluster. Tot op zekere hoogte wordt dit gereguleerd door de hoeveelheid materie die een heelalmodel bevat. Modellen met een lage dichtheid hebben de meeste groei in het vroege heelal via zeer zware mergers. In tegenstelling tot universums met een hoge dichtheid, waar zulke mergers op het huidige tijdstip vaker voorkomen.

De spreiding rond de gemiddelde accretiegeschiedenis is zeer groot. Daardoor is het mogelijk dat de trends in de accretiegeschiedenis uit verschillende simulaties met elkaar overlappen. Het zal daarom zeer moeilijk zijn om de subtiele invloed van de kosmologische constante hierin te ontdekken.



Figuur 2 — Drie verschillende simulaties: ΛCDMF2 (boven), ΛCDMO2 (midden) en ΛCDMC2 (onder). De inzet rechts toont een uitvergroting van het gebied links.

We hebben ook gekeken naar de virialisatie van halo's en in het bijzonder clusterhalo's. Het blijkt dat de halopopulatie in alle modellen op het huidige tijdstip nagenoeg volledig is gevirialiseerd. Echter, de gevonden waarden zijn niet perfect in overeenstemming met de theoretische relatie voor bolvormige objecten. Met name lichtere halo's vertonen een grote spreiding ten opzichte van deze relatie. De spreiding bij zwaardere clusters halos is daar en tegen veel minder. Onafhankelijk van de kosmologische achtergrond volgen alle clusters dezelfde viriaalrelatie. Wel heeft de kosmologie invloed op de spreiding die we vinden ten opzichte van deze viriaalrelatie, die is groter voor modellen met een hogere massadichtheid.

Fysische eigenschappen van Clusters

De fysische eigenschappen van clusters zijn in Hoofdstuk 4 onderzocht. Hier hebben we gekeken naar de invloed van een positieve kosmologische constante op de interne verdeling van de massa, de vorm, de morfologie en het hoekmoment. De interne ruimtelijke verdeling van de massa kan worden beschreven door middel van een dichtheidsprofiel. Wij hebben gevonden dat dit profiel hetzelfde gedrag vertoont in alle simulaties. Wel blijken de halo's in hogere dichtheids modellen meer geconcentreerd te zijn. Deze mate van concentratie is niet afhankelijk van de waarde van de kosmologische constante. De morfologie van halo's kan goed beschreven door een triaxiale vorm, waarbij er een voorkeur is voor een sigaarvormige verhouding (twee korte assen en een lange as). De mate waarin een object van een bepaalde massa afwijkt van een bolvorm is afhankelijk van de kosmologie. Clusters in een heelal met een hoge dichtheid hebben een grotere afwijking en zijn dus minder bolvormig. Tot slotte vinden we dat het hoekmoment van halo's toeneemt, wat sterk gerelateerd is aan een toename van de massa.

Schalingsrelaties

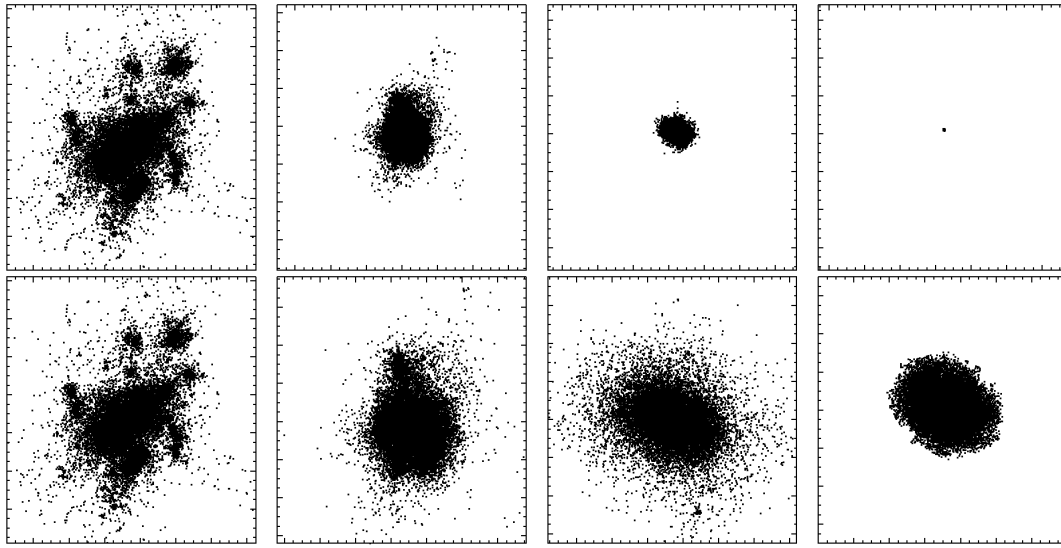
De structuur en dynamica van (bijna) gevirialiseerde objecten als clusters van sterrenstelsels valt te verklaren uit een aantal fundamentele schalingsrelaties tussen; massa, afmeting en kinematica (snelheidsdispersie). In hoofdstuk 5 kijken we naar de Kormendy, de Faber-Jackson en de *Fundamental Plane* relaties. Alhoewel deze relaties eerst werden ontdekt voor elliptische melkwegstelsels Schaeffer et al. (1993), blijken ze ook voor clusters goed te gelden. Wij vinden dat de clusters in alle simulaties voldoen aan de Kormendy, Faber-Jackson en *Fundamental Plane* relaties. De Kormendy en de Faber-Jackson vertonen geen afhankelijkheid van de kosmologische constante, wel zijn ze in mindere mate afhankelijk van de totale dichtheid van het Heelal. In de *Fundamental Plane* relatie is deze afhankelijkheid nog beter terug te vinden. De breedte van de *Fundamental Plane* schaalt bijna perfect met de materiedichtheid van het Heelal. Dit blijkt een directe afspiegeling te zijn van de mate van virialisatie van clusters. De evolutie van de Kormendy en de Faber-Jackson relatie geeft een indicatie waar de clusters zich in het *Fundamental Plane* bevinden.

Toekomstige evolutie van het Heelal

N-deeltjes simulaties zijn een noodzakelijk gereedschap voor het onderzoek naar structuur in het Heelal. Ze representeren realistische beschrijvingen van de vorming en evolutie van structuren in het Heelal. Ze stellen ons ook in staat om de invloed te bestuderen die de kosmologische constante heeft op de toekomstige evolutie in het Heelal. In hoofdstuk 6 bestuderen we de toekomstevolutie van clusters van sterrenstelsels. Figuur 3 laat zien hoe een object in een expanderend Heelal er uit zal komen te zien. In de bovenste afbeelding laten we de evolutie in *comoving* coördinaten zien, en in de onderste de evolutie in fysische coördinaten. De fysische coördinaten laten zien dat het object nagenoeg even groot blijft, terwijl in *comoving* coördinaten het object krimpt, tot het uiteindelijk niet meer zichtbaar zal zijn door de expansie van het Heelal.

De massaverdeling van objecten (het aantal objecten van een bepaalde massa) zal in de nabije toekomst constant blijven aangezien er geen groei van structuur is 'uitgevroren'. Gevolg is dat er nauwelijks nog verschil is tussen de mass-accretiegeschiedenis in de verschillende modellen. De evolutie

in de toekomst beperkt zich tot het steeds bolvormiger worden van de objecten, waarin ze een perfect bolvormige stadium bereiken in de verre toekomst. Doordat er geen of nauwelijks nog massa-accretie plaats vindt, blijft het hoekmoment ongeveer constant. Bovendien zullen de clusters hierdoor in hoge mate gevirialiseerd zijn. Dit valt ook te zien in de schalingsrelaties, waarin veel minder spreiding is te zien. De breedte van de *Fundamental Plane* is smaller dan op het huidige kosmologische tijdstip en is nagenoeg hetzelfde voor elke simulatie. Dit duidt er op dat clusters genoeg tijd hebben gehad om te virializeren en in dynamische evenwicht te komen. We concluderen hieruit dat het in de verre toekomst bijzonder moeilijk zal zijn om na te gaan in wat voor een Heelal we leven.



Figuur 3 — Evolutie van een enkele in een kritisch Heelal. Boven: evolutie in comoving coördinaten. Onder: evolutie in fysieke coördinaten.

Supercluster of galaxies

Identificatie van superclusters van melkwegstelsels is bijzonder moeilijk. Deze objecten zijn de grootste structuren in de hiërarchie van het Heelal, en zijn pas net aan het vormen. Hier passen we een criterium toe waarin superclusters worden geïdentificeerd met gravitationeel gebonden objecten, Dünner et al. (2006). We gebruiken dit als een fysieke definitie voor superclusters van sterrenstelsels. Met behulp van hun gemeten massaverdeling en de aanname dat dit de meest massieve structuren zijn, zou het meest massieve object in het Lokale Universum een massa van $\sim 8 \times 10^{15} h^{-1} M_{\odot}$ moeten hebben. Dit is slechts iets massiever dan de gemeten massa van de Shapely Supercluster (de grootste concentratie van melkwegstelsels in het Lokale Universum), zie ook Dünner et al. (2008). Op basis van ons model zouden we 2 objecten in het Lokale Universum verwachten met dezelfde massa en grootte als de Shapely Supercluster. De morfologie van superclusters wordt gekenmerkt door een zeer veel substructuur, en een globale structuur die langgerekt van vorm is.

Conclusies

In dit proefschrift hebben we de invloed onderzocht die de kosmologische constante heeft op de vorming en evolutie van clusters van sterrenstelsels. Hiertoe, hebben we gebruik gemaakt van een grote set van kosmologische simulaties die uit drie geometrische modellen kunnen bestaan: open, kritisch en gesloten. De simulaties bestaan telkens uit twee versies waarbij in de ene wel en in de andere geen kosmologische constante voorkomt. Op deze manier hebben we geprobeerd beter te achterhalen wat

de invloed is van de kosmologische constante op de structuur, dynamica en evolutie van clusters van melkwegstelsels.

Verschillende onderwerpen over de globale en individuele eigenschappen zijn hierbij onderzocht. Hieruit hebben we geconcludeerd dat de kosmologische constante geen invloed heeft op de vorming en evolutie van clusters. Het enige aantoonbaar effect is de invloed die het heeft op de kosmische tijd: het verlengt of verkort de beschikbare dynamische tijd voor evolutie van clusters.